

# 浅覆盖区浅成低温热液型金矿地球物理勘查方法——以黑龙江省黑河市阿陵河矿区为例

殷启春<sup>1,2,3,4,5</sup>, 纪元<sup>3,5</sup>, 王康<sup>3,5</sup>, 谭桂丽<sup>6</sup>, 孙桐<sup>3,5\*</sup>, 杨华本<sup>1,5</sup>, 陈海江<sup>1,5</sup>, 孙彦海<sup>1,5</sup>

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081;
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034;
3. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;
4. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083;
5. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086;
6. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016



**摘要:**浅覆盖区地质找矿难度大,尤其是浅成低温热液型金矿体,其地球物理特征不明显,导致有效信息提取困难。在东北森林浅覆盖区的阿陵河矿区,对土壤金异常区实施了1/5 000高精度磁法扫面、1/5 000激电中梯扫面和高密度激电法等一系列地球物理勘探工作后,开展了钻探查证和测井分析工作。结果表明:安山岩分布区的热液蚀变具有低磁异常和低视电阻率值,二者分布规律基本一致。通过对地球物理异常验证钻孔揭露的6条金矿体开展综合测井分析,根据磁性、电性和极化率组合及其空间分布特征,将低硫型金矿体划分为通道型和末端型2种成因类型。研究表明,采用综合物探方法逐步聚焦勘探靶区的找矿效果显著,为浅覆盖区浅成低温热液型金矿的地球物理勘查提供了有效示范。

**关键词:**浅覆盖区;浅成低温热液型金矿;低硫型;综合地球物理勘查;测井分析;热液蚀变;阿陵河矿区;黑龙江省

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)02-0225-14 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.02.316

引用格式:YIN Qichun, JI Yuan, WANG Kang, et al. Geophysical Exploration Method of Epithermal Gold Deposit in Shallow Overburden Area: A Case Study of Alinghe Mining Area in Heihe City, Heilongjiang Province[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(2): 225-238. 殷启春, 纪元, 王康, 等. 浅覆盖区浅成低温热液型金矿地球物理勘查方法——以黑龙江省黑河市阿陵河矿区为例[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(2): 225-238.

浅成低温热液型金矿床因成矿深度浅(小于2 km)和成矿温度低(低于300℃)而得名,在成因上与浅成、超浅成侵入作用和陆相火山、次火山作用有关,往往伴随着多期侵入的中酸性岩体发育(Hedenquist et al., 1994)。浅成低温热液型金矿可划分为低硫型、中硫型和高硫型。在全球范围内,浅成低温热液型金矿主要位于环太平洋成矿带、特

提斯成矿带和劳亚成矿带3个巨型成矿域,具有重要的研究价值和意义(Sillitoe, 1997, 2010; Lipson, 2014)。金矿体的边界品位一般界定为 $0.3 \times 10^{-9}$ ~ $0.5 \times 10^{-9}$ ,金含量非常低,金矿体本身的物性与未矿化的围岩没有明显的差别,不足以产生明显的地球物理异常,因此无法直接对金矿进行地球物理探测。金矿体成矿过程明显受控于特定的地质条件,

收稿日期:2024-09-30;修订日期:2025-02-14

基金项目:中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目“松嫩平原典型区地表基岩空间结构综合地球物理技术研究”(编号:QCJJ2022-3)、中国地质调查局地质调查项目“黑龙江黑河三道湾子一带金矿资源潜力评价”(编号:DD20230395)和有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学)开放基金资助项目“浅成低温热液型金矿定位与预测研究——以黑龙江省黑河市阿陵河矿区为例”(编号:2024YSJS13)联合资助

作者简介:殷启春(1977-),男,江苏泰州人,高级工程师,从事地质矿产与综合地球物理勘探及研究工作。yinqc@mail.cgs.gov.cn

\*通信作者:孙桐(1989-),男,吉林吉林人,高级工程师,从事地质矿产与综合地球物理勘探及研究工作。suntong@mail.cgs.gov.cn

含金热液在运移过程中对地质体产生的物理、化学变化构成了金矿勘查的对象(Henley, 1991; Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2003)。

前人利用不同地球物理方法发现浅成低温热液型金矿带位于高低相间的磁异常带和低电阻率带内(Kawasaki et al., 1986; 吴国学, 2007; 张富程等, 2015)。高密度激电法对于探测金矿浅部岩体、构造和硅化等具有一定的效果(孙中任等, 2004; 马德锡等, 2008)。以往研究表明, 浅成低温热液所产生的热液蚀变会造成岩石磁化率降低, 硅化作用可以明显增加多孔火山岩的密度和电阻率, 泥化则可以使大多数火山岩的电阻率降低1~2个数量级, 硫化物(以黄铁矿为主)则具有低电阻率和高极化率特征(Seigel et al., 1984; Allis, 1990; Doyle, 1990; Hoshke, et al., 2005; Hoshke, 2011; 刘善丽等, 2011; 万飞, 2013; Fatehi et al., 2019; 殷启春等, 2022; Richarte et al., 2023)。

以上地球物理研究工作侧重于在已知矿床运用单一地球物理方法开展研究工作, 尚未建立从地面到井中成功发现浅成低温热液型金矿体的系统性地球物理勘查方法, 对极化率与金矿化体空间分布的差异性研究也未见相关报道。此外, 研究区在地貌上属于典型的中国东北森林浅覆盖区, 露头少, 以往金矿勘探的有效方法是地球化学测量—槽探—钻探(陈满等, 2008)。近年来, 随着生态环境保护政策的发布实施, 林区槽探难以施工, 传统的地质和矿产填图方法找矿效果不佳, 因此需要运用地球物理方法开展选区和验证孔部署等方面的工作。本研究在阿陵河矿区以往地质填图和土壤地球化学测量工作的基础上, 将金矿体、蚀变带及其围岩视为一个系统勘探研究对象, 开展了一系列地球物理探测工作。通过实施验证钻孔ZK01, 在100 m以浅发现6条金矿化体, 为此类金矿勘探提供了一个从选区到实施钻孔验证的应用地球物理勘查范例, 有助于浅覆盖地区浅成低温热液型金矿勘查取得更大突破。

## 1 研究区地质概况

### 1.1 地质概况

阿陵河矿区位于天山兴蒙造山系东段, 作为松

辽盆地拆离断裂或西缘控盆断裂的嫩江—八里罕断裂, 与作为兴安地块和松嫩—锡林浩特地块拼合带的贺根山—黑河缝合带(HHS)交会于研究区北西侧(图1)(刘永江等, 2019)。阿陵河矿区位于多宝山—黑河成矿带内, 该矿带地质构造复杂, 岩浆活动强烈, 为区域多金属矿形成提供了重要的基础地质条件。以嫩江—八里罕断裂的北段新开岭断裂为界, 成矿带北侧分布有多宝山铜钼金矿、铜山铜钼矿、争光金矿和三道湾子金矿等多金属矿床, 南侧分布有永新和孟德河等浅成低温热液型金矿(李成禄, 2018; 刘宝山等, 2022)。以往研究普遍认为该金矿类型属于浅成中—低温热液型(赵忠海等, 2011; 程琳, 2017; 孙景贵等, 2023; 柏铖璘等, 2024), 成矿流体主要为岩浆水且往多宝山矿外围大气水比例增大, 成矿时代主要为燕山期, 成矿物质来源包括地幔和围岩。多宝山—黑河成矿带内金矿地球物理找矿标志方面的研究(郝宇杰, 2015; 李成禄, 2018; 赵理芳等, 2022)发现, 地球物理异常与化探异常套合部位是有利的成矿部位, 金矿体位于条带状磁异常、中低视电阻率和条带状视极化率带, 并认为在争光金矿等浅成低温热液型金矿下方可能赋存有斑岩型铜矿, 而现有近地表铜矿上方的浅成低温热液型金矿已被剥蚀。以上多宝山—黑河成矿带内地球物理工作证实磁化率、电阻率和极化率参数在该区浅成低温热液型金矿勘探中发挥了一定作用。

阿陵河金矿位于新开岭断裂南侧, 公别拉—五马子火山断陷盆地内, 盆内主要发育有下白垩统龙江组( $K_1l$ )安山岩和安山质火山角砾岩, 下白垩统光华组( $K_1gn$ )流纹岩和流纹质火山角砾岩等火山岩一次火山岩组合。矿区内构造包括NE、NW和近EW向3组断裂。区内植被发育且覆盖较厚。作为多宝山—黑河成矿带的一部分, 阿陵河金矿成矿作用属于晚侏罗—早白垩世火山—侵入岩浆热液Cu—Mo—Au—Ag成矿系列(李德荣等, 2011)。

### 1.2 金地球化学特征与地球物理工作部署

土壤金地球化学异常是浅覆盖区金矿选区重要指标之一。对1/1万土壤金地球化学测量数据进行分析, 根据测量得到的金异常面积、均值和极值等进行排序和分类, 认为本区为Au元素高含量场, 共圈定出金含量大于 $12.0 \times 10^{-9}$ 的金地球化学异常

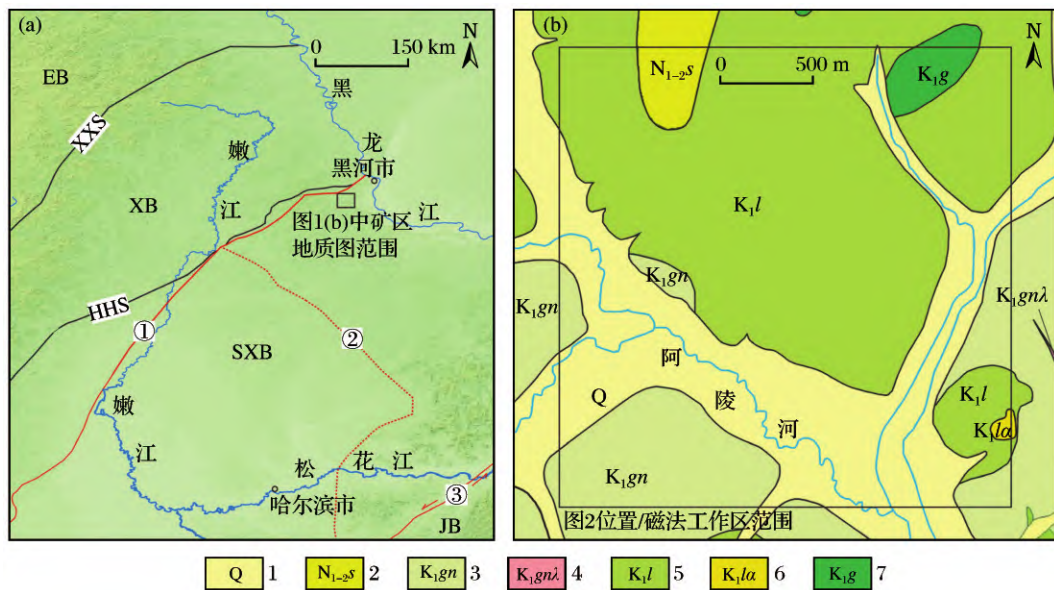


图1 黑龙江省黑河市阿陵河矿区大地构造位置(a)(修改自刘永江等,2019;地理底图转自天地图(www.tianditu.gov.cn),审图号为GS(2024)0568号)和矿区地质图(b)

Fig.1 Tectonic location(a)(modified after Liu et al., 2019; the geographical base map was obtained from Tianditu (www.tianditu.gov.cn), bearing the map content approval number of No.GS(2024)0568) and geological map(b) of the Alinghe mining area in Heihe City, Heilongjiang Province

EB-额尔古纳地块;XB-兴安地块;SXB-松嫩-锡林浩特地块;JB-佳木斯地块;XXS-新林-喜桂图缝合带;HHS-贺根山-黑河缝合带;①-嫩江-八里罕断裂;②-松嫩盆地东北边界断裂;③-佳木斯-伊通断裂;1.第四系;2.新近纪孙吴组砂砾岩;3.下白垩统光华组流纹岩;4.下白垩统光华组流纹质火山角砾岩;5.下白垩统龙江组安山岩;6.下白垩统龙江组安山质火山角砾岩;7.下白垩统甘河组安山玄武岩

区3处(图2)。金异常区走向以NE和NNE向为主,少量呈SE向。研究区无岩石露头,均为2~3 m埋深的土壤覆盖区,地表可见少量安山岩转石。为查明研究区是否存在金矿体及其地下分布特征,在土壤地球化学工作区外围开展了1/5 000地面高精度磁测工作,工作区范围如图1(b)所示,即图2中图框范围。进一步对圈定的3处金地球化学异常区开展激电中梯和高密度激电测量工作,并适当开展钻探验证工作。由于施工钻孔为斜孔,仅对其中倾角大于70°的ZK01钻孔实施了测井工作,其他钻孔倾角较小的验证孔位在实施测井过程中遭遇卡探管事故,未能完成测井工作。本研究仅对具有完整地球物理资料的Au1区开展了研究分析工作。

### 1.3 岩石物性特征

本研究在收集前人资料的基础上,测试了部分岩(矿)石样品物性,并对测试结果进行了统计,根据规范要求计算了几何平均值和算术平均值,结果见表1。

由表1可知,岩石磁性由大到小的排序为安山

玄武岩>完整安山岩>破碎安山岩>安山质火山角砾岩>流纹岩,显示出磁性大小与暗色矿物含量关系大致呈正相关关系。电阻率由大到小的排序为安山玄武岩>完整安山岩>流纹岩>安山质火山角砾岩>破碎安山岩,显示出电阻率受岩性和产出状态(破碎程度和孔隙度等)的影响。岩石物性测试结果表明,研究区极化率与磁化率大小总体呈正相关关系。

在区域范围内,本研究测量的地层与岩体物性参数(如密度、磁化率和电阻率)与前人研究相近。有关矿化蚀变相关物性的研究(张富程等,2015;史冬岩等,2021;赵理芳等,2022;赵忠海等,2024),进一步表明热液矿化活动对物性具有一定的影响,安山岩和花岗闪长岩类围岩经矿化蚀变后密度增大。在磁性方面,蚀变后的安山岩和安山质火山角砾岩磁化率明显低于未蚀变的安山岩和安山质火山角砾岩,说明成矿热液对岩石起到退磁作用。在电阻率方面,蚀变后的岩石电阻率发生不同程度的降低,硅化安山岩电阻率相对原岩电阻率呈明显增加。在极化率方面,由于围岩自身和矿化所产生的



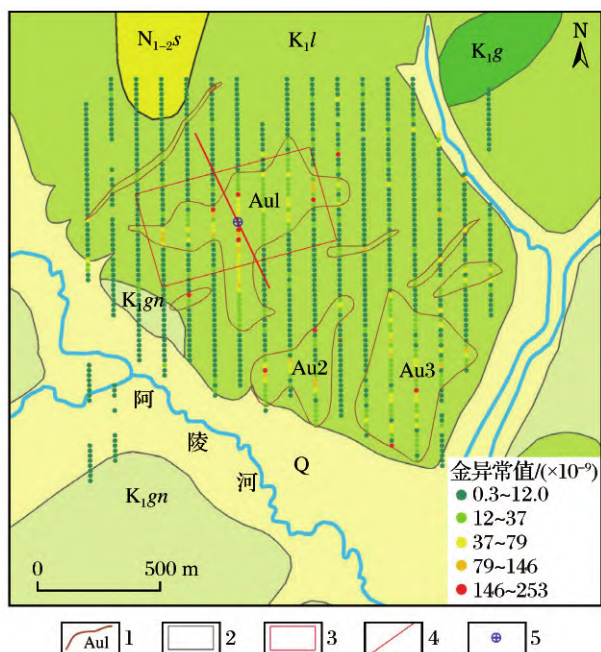


图2 阿陵河矿区金地球化学异常与地球物理工作区位置  
Fig.2 Location map of geochemical gold anomalies and geophysical work area in the Alinghe mining area

Q-第四系;N<sub>1-2s</sub>-新近纪孙吴组砂砾岩;K<sub>1gn</sub>-下白垩统光华组流纹岩;K<sub>1l</sub>-下白垩统龙江组安山岩;K<sub>1g</sub>-下白垩统甘河组安山玄武岩;  
1.土壤金异常边界(>12×10<sup>-9</sup>)及编号;2.地面高精度磁测范围(全图范围内);3.激电中梯工作区范围;4.高密度激电测线位置;  
5.验证钻孔位置

极性物质含量不同而具有一定的差异,金矿化体为低硫型,因成矿过程不同,极化率分别表现为低极化率和低—中极化率,且这种差别小于因岩性差异产生的极化率差异。本研究进一步开展了高精度测井数据采集,测井精度和效果大于来源多样的物性样品测试结果,揭示了钻孔内相关围岩、蚀变带和含金层位的磁化率、电阻率和极化率变化规律,为地

面物探工作的开展和解译提供了物性依据。

2 地球物理数据采集与处理

2.1 综合地球物理勘探方法

在分析土壤化探金异常的基础上,依据“从已知到未知”、“从浅部到深部”、“从扫面到测深”和“从蚀变到矿体”的地质—地球物理综合研究勘探原则,按照如图3所示的技术路线开展了综合地球物理勘探工作。

首先,在土壤金地球化学异常区开展全覆盖的1/5 000高精度磁法测量扫面工作。对推断的有利蚀变区 Au1 开展 1/5 000 激电中梯扫面工作。然后,根据电阻率与极化率平面特征,优选有利矿化区,进一步开展高密度激电法测量,总结垂向岩体、构造结构和蚀变带空间展布特征。最后,结合综合物探研究结果,开展钻孔验证工作。此外,还开展了多参数测井工作,分析围岩、蚀变带和含矿段的各类地球物理参数特征,总结成矿规律,指导进一步找矿勘探工作。

2.2 综合地球物理数据采集

(1)地面高精度磁法数据采集与处理

磁法勘探是通过观测岩石在地面高度的磁场值来分析研究地质体与矿体分布形态的地球物理方法,被广泛应用于地质矿产调查和金矿勘查领域(郝天珧等,1996;刘善丽等,2011)。本次磁法工作采用6台加拿大GEM公司生产的GSM-19T型质子磁力仪进行野外测量,测线方向为90°,测网为50 m×20 m,ΔT观测总误差为4.25 nT(<5 nT),达到高精度磁测规范要求。

采用乌鲁木齐金维公司的GeoIPAS开展数据

表1 研究区岩(矿)石物性特征

Table 1 Physical characteristics of rock and ore in the study area

岩性	样品数量 /个	磁化率/(×10 <sup>-5</sup> SI)		电阻率/(Ω·m)		极化率/%	
		取值范围	几何平均值	取值范围	几何平均值	取值范围	算术平均值
安山岩(完整)	108	12~1 510	170.1	80~4 300	609.6	2.5~60.0	26.9
安山岩(破碎)	11	35~933	113.7	65~407	182.9	4.6~16.8	10.6
安山玄武岩	8	2 500~3 130	2 889.4	7 000~21 000	11 154.2	11~16	12.7
安山质火山角砾岩	48	8~490	133.9	50~2 805	267.6	3.43~29.00	7.9
流纹岩	13	0.6~6.0	3.1	500~993	690.5	4.5~30.0	18.5
矿化体—破碎带型	32	10~490	82.3	120~1 076	283.4	3.6~63.8	17.2
矿化体—硅化型	16	6.5~37.5	19.9	476~2 806	789.6	25~50	37.6

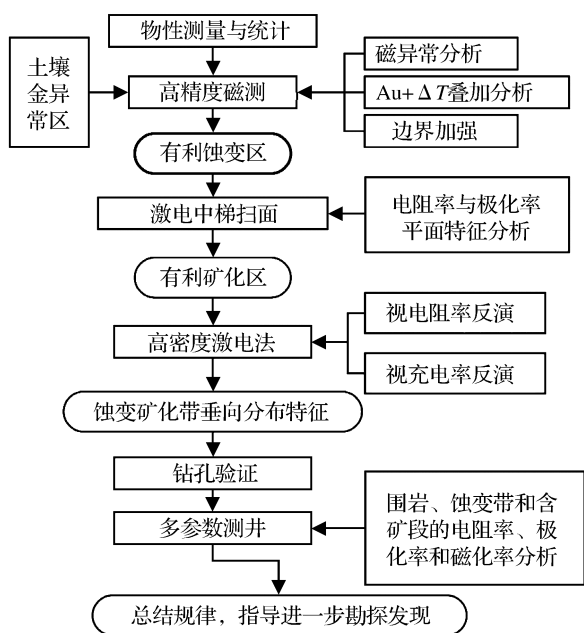


图3 浅覆盖区浅成低温热液型金矿地球物理勘探技术路线图

Fig.3 Geophysical exploration technology route map for epithermal gold deposits in shallow overburden area

处理,包括日变改正、基点改正、高度改正和纬度改正等内容。 $\Delta T$ 数据网格化采用克里金插值法,网格间距为10 m,根据解释需求对数据进行必要的处理,如采用化极和求导等方法来满足不同情况的地质解释需要。

### (2) 激电中梯法采集与处理

激电中梯法测量属于常规电法,可获取视电阻率和视极化率2个参数。中间梯度装置(简称为中梯)是激电法扫面工作的一种主要观测系统,测量时2个供电电极固定不动,测量电极在AB中部范围(通常是1/2~1/3AB距离)移动测量。测量计算的视极化率( $\eta_s$ )通常以百分数表示,计算公式为

$$\eta_s = \frac{\Delta U_2(t)}{\Delta U(T)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta U(T)$ 为极化场电位差; $\Delta U_2(t)$ 为断电后某一时刻 $t$ 测得的二次场电位差。

本次激电中梯测量使用继善高科公司生产的SQ-5双频道激电仪进行野外测量工作。该仪器为频率域测量,测量参数为高频电位差 $\Delta U_c$ (mV)、低频电位差 $\Delta U_d$ (mV)和供电电流 $I_{AB}$ (mA),并根据装置参数 $K$ 计算出视幅频率 $F_s$ (%)。

高频视电阻率计算公式为

$$\rho_{SG} = K \Delta U_c / I_{AB} \quad (2)$$

低频视电阻率计算公式为

$$\rho_{SD} = K \Delta U_d / I_{AB} \quad (3)$$

视幅频率计算公式为

$$F_s = (\Delta U_d - \Delta U_c) / \Delta U_c \times 100\% = \eta_s / \rho_{SG} \quad (4)$$

对比式(1)与式(4)的中间部分可以看出, $\eta_s$ 和 $F_s$ 具有相同的变化规律;式(4)的右侧部分则进一步反映了 $F_s$ 的物理本质与 $\eta_s$ 相同,但利用视电阻率对其进行了加权(王宏宇等,2016)。

经最佳频点、供电距和测量距选择试验后,本次测量选择仪器频点为2,网度为50 m×10 m(线距×点距),布设测线15条,测线方位为164°,供电距AB为800 m,测量距MN为20 m。

### (3) 高密度激电法采集与处理

高密度激电法的原理与传统直流激电测深法相同,可在垂向上获取视电阻率和视充电率2个参数。视充电率在充电时间相同或相近时,相当于二次场衰变过程中某点的视极化率 $\eta_s$ 与固定值K的乘积(崔峰,1990),与视幅频率一样,均反映视极化率。高密度激电法可同时布设数十根至数百根电极,自动采集数据,具有处理信息量大、工作效率高等优点,在100 m以内的电阻率和极化率反演分辨率高于常规电法工作。其缺点是探测深度相对其他电法浅,通常埋深在100 m以内,但其探测深度适用于浅成低温型金矿,因此可以采用高密度激电法。本次高密度激电野外工作所使用的仪器为美国AGI公司生产的SuperSting-R8高密度电法测量系统。经试验后,本次测量预置供电时间为2 s,重复测量2次,重复测量误差小于2%。观测采用温纳装置,电极距为10 m。

野外采集数据采用EarthImager2D进行处理和反演。二维反演算法采用Occam进行反演,该方法也被称为平滑模型反演法(Smooth Model Inversion)。反演过程中,正演方法采用有限元法,正演求解器为乔里斯基(Cholesky)分解,边界条件采用狄利克雷(Dirichlet),电阻率反演初始模型采用拟断面,最大均方误差为3%,视充电率反演采用线性感应极化反演法,圆滑系数和阻尼系数均为10。

### (4) 测井采集与处理

测井是一种原位测量各种岩矿石物理性质的



地球物理方法,为获取岩性、构造、蚀变和矿化层划分提供了依据。本次测井采用尚矿(河北)科技有限公司生产的JHQ-PSK-2综合数控测井系统,测井项目包括井径、井液电阻率、自然电位、自然伽玛、双侧向电阻率、极化率和磁化率测井等多种测井参数。其中,与本研究相关的参数如下:

①双侧向电阻率测井:能够提供深、浅2条视电阻率曲线,其中深电阻率曲线主要反映原状岩层电阻率,浅电阻率曲线主要反映井液侵入带地层电阻率,以及岩层中裂缝的不同宽度、位置和产状(葛新民等,2019)。本次分析采用深电阻率曲线。

②极化率测井:通过给岩层供入激发电流场,测量这种极化电动势就是极化率测井。极化率的大小及其变化规律与组成岩(矿)石的化学成分、矿物结构以及深入其中的溶液性质有关。在富含以黄铁矿为代表的岩层中,呈现出高极化率异常。

③磁化率测井:探管中带铁芯的螺线管与钻孔中岩层构成闭合磁通回路,岩层磁化率的变化会引起自感变化,从而可以测量出岩层磁化率的变化。

### 3 矿区平面地球物理特征与矿化带优选

#### 3.1 地面高精度磁法

研究区磁场值 $\Delta T$ 总体变化特征表现为平缓变化中夹杂着复杂起伏(图4),这种磁场总体变化特征反映了不同岩性的分布。按照研究区磁场分布特征,可划分为中—高异常区、平缓低异常区和局部叠加异常区3种异常分区。

(1)中—高磁异常区:主要分布于研究区北侧,场值基本在0~800 nT内变化,南西部多为低异常分割,北东部多为高异常分割。地质资料显示,该区磁场分布以中性为主,夹杂高磁性暗色矿物的龙江组安山岩( $K_1l$ ),是引起本区中高异常区的主要原因。

(2)平缓低磁异常区:主要分布于研究区南部,场值基本在-200~600 nT之间变化,磁场变化总体相对平缓,局部夹杂高低异常区。地质资料显示,该区主要分布酸性光华组流纹岩( $K_1gn$ ),是引起本区平缓低磁异常的主要原因。

(3)局部叠加异常区:在上述两大磁异常区内部,零散分布的高值区为甘河组玄武岩( $K_1g$ ),主要分布在研究区北部。该类型磁法异常与填图单元

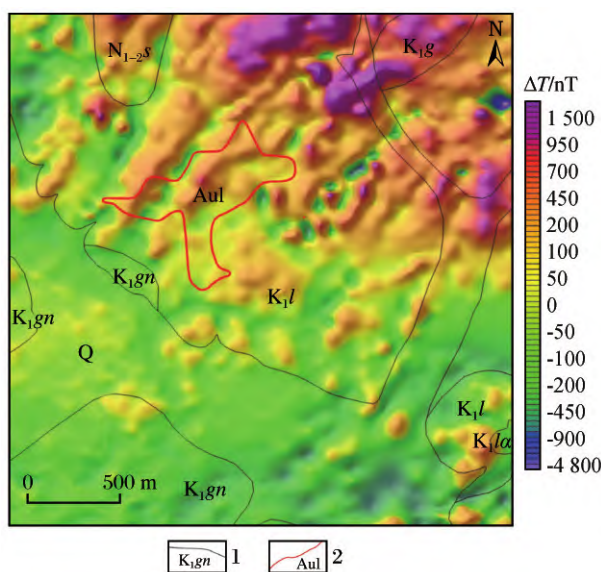


图4 研究区磁场 $\Delta T$ 等值线及地质边界图

Fig.4  $\Delta T$  contours and geological boundary map of the study area

1.岩体边界及代号;2.土壤金异常边界及编号

相比具有一定的差异,推测是由覆盖区露头有限所致,磁法异常可靠性应大于依赖转石的填图结果。孙吴组砾岩( $N_{1-2}s$ )主要分布于北部,相对为低值区。

在两大磁异常区衔接区,高低异常相互交替出现,在地质图上表现为安山岩与流纹岩的衔接部位,已有土壤金异常均位于该部位。其中,土壤金异常高值区Aul具有明显的NE走向条带状高低磁异常交叉分布特征,结合物性特征分析,其中的低磁异常可能为热液蚀变区(Allis, 1990)。以往研究发现,岩石中的磁黄铁矿在温度为340℃时即可达到磁化率最低的居里温度(完全退磁)(刘晓宇, 2021),英安岩的磁化率在温度为100℃时明显下降(孙靖鹏, 2016)。该区的磁场值最高为1 124 nT,最低为-430 nT,差值达1 554 nT,表明热液的退磁作用可达1 000 nT。这与多宝山—黑河成矿带高松山金矿(属于浅成低温热液型金矿,围岩为安山岩)的磁异常研究结果一致(朱炼, 2014)。为查明条带状磁异常与土壤金异常的电性平面分布特征,围绕该区进一步开展激电中梯扫面工作。

#### 3.2 激电中梯法

对土壤化探金异常和磁异常推断的蚀变区开展了1/5 000激电中梯扫面工作,位置如图2所示,获取视电阻率和视幅频率等值线图(图5)。综合研

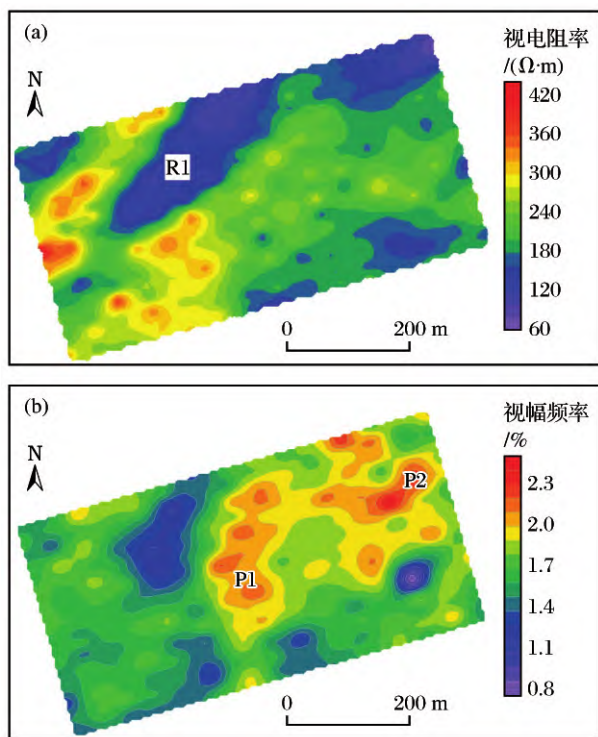


图5 研究区激电中梯视电阻率和视幅频率等值线图  
Fig.5 Contour maps of induced polarization intermediate gradient apparent resistivity and apparent amplitude frequency in the study area

究区激电中梯测量的视电阻率和视幅频率结果,以及地质、物性和磁测结果,总结出该研究区具有如下特征:

(1)视电阻率异常总体走向与磁异常总体走向一致,均呈NE向高低相间分布。低视电阻率区R1[图5(a)]与Au1区西侧的低磁异常区(图4)相比,走向和分布范围基本一致。R1外侧的高电阻率异常区与高磁异常区基本一致。考虑到本区的岩性均为安山岩,低阻区电阻率值小于 $200 \Omega \cdot \text{m}$ ,推测为岩浆热液通道,在近地表处风化为含水破碎带。

(2)视幅频率高异常区P1,视幅频率值范围为 $2.0\% \sim 2.9\%$ ,异常宽度约为100 m,基本贯穿测区未封闭。P1走向SSE,与该区金异常走向一致。高异常区P2位于P1的北东侧,相对比较分散。除了金异常的西侧异常外,其余部分的视幅频率异常分布与金异常基本一致。

(3)与电阻率和磁异常不同,视电阻率与视幅频率的平面走向无明显相关性,这可能是因为热液

活动与破碎带分布密切相关,且影响范围较大,而与成矿相关的黄铁矿等极化物质是小空间分布事件。从分布连续性来看,热液蚀变区连续分布,而黄铁矿化区断续分布。

前人研究表明,本区各类无黄铁矿化的火山岩极化率参数差异不大(孙中任等,2004)。综上所述,结合磁异常和Au元素异常特征,认为视幅频率P1异常可能与金矿化有关,因此围绕P1异常实施了高密度激发极化法,进一步查明该视幅频率异常的垂向分布特征,从而为论证验证钻孔位置提供地下结构依据。

#### 4 金矿化带垂向特征

为调查土壤金异常区Au1和视幅频率异常区P1的岩体、构造和蚀变带垂向展布特征,实施了高密度激电测线,位置如图2所示。测线二维反演结果显示,浅部30 m以内视电阻率与激电中梯视电阻率平面分布一致(图5和图6),表明激电中梯扫描结果中的视电阻率为研究区30 m以浅的综合反映。在测线500~300 m处有一条倾向SE的低阻带,结合地质填图,推断为富含水的破碎安山岩[图6(a)],对应于磁异常的低值区。该低阻带往下延伸,在20~90 m处倾向SE分布,其中局部高充电率异常相对陡立分布[图6(b)],进一步推断含水破碎安山岩区下方为蚀变的热液通道。值得注意的是,高充电率异常位于地下水富含区下方,这与以往含矿热液与循环的地下水混合后沉淀会导致金沉淀(毛光武等,2015)的认识是一致的,因此推断该低磁、低阻和高充电率异常组合为有利矿化区域。在该推断有利矿化区域布设钻孔并实施测井工作(图6),进一步落实蚀变带地球物理特征,探索研究区金矿体分布规律。

#### 5 钻孔验证与测井分析金矿体地球物理特征

##### 5.1 钻孔验证结果

验证钻孔ZK01设计走向为 $320^\circ$ ,倾角为 $70^\circ$ ,设计深度贯穿推断热液蚀变带(图6)。实际钻遇岩性主要为安山岩和安山质火山角砾岩,破碎带发



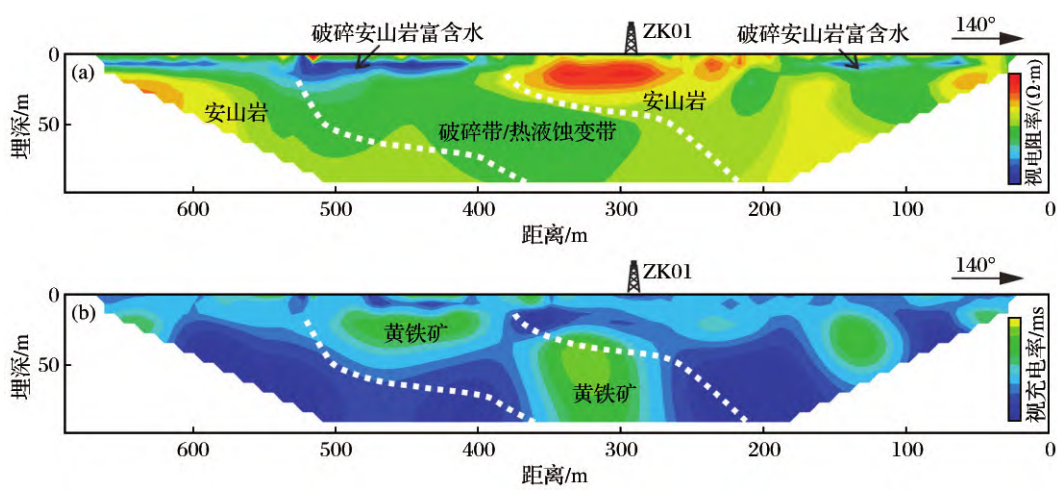


图6 高密度激发极化法视电阻率和视充电率反演与解释示意图

Fig.6 Schematic diagram of inversion and interpretation of apparent resistivity and apparent chargeability by high density induced polarization method

育,伴有硅化(石英细脉发育)和黄铁矿化现象。钻孔见矿效果较好:圈定100 m以浅金矿体6条,单样最高品位为 $0.85\times 10^{-9}$ ,含矿围岩主要为安山质火山角砾岩(图7)。

5.2 测井分析

在金矿测井资料研究方面,以往研究主要集中于与金矿体、黄铁矿体分布一致的中—高硫型(Li et al., 2018; Huang et al., 2022),而关于低硫型浅成低温热液型金矿的测井响应及其与地面电法反演剖面的对比研究偏少。本次研究测井响应特征,先对测井曲线进行深度校正和突变处理,然后参考岩心编录和试验测试等资料开展研究工作,分析各类岩性、蚀变和含矿层位的测井响应特征,从而指导地面地球物理找矿工作。

根据岩性编录结果,ZK01 钻孔岩性较为单一(图7),可划分为6段:0~5.23 m 深度为表层土壤,无测井曲线,本段反映了浅覆盖区特点;5.23~17.75 m 深度为灰黑、灰绿色安山岩,呈高磁化率—高电阻率—低极化率组合特征;17.75~81.45 m 深度为灰色、灰绿色安山质角砾岩,本段钻遇金矿化体;81.45~95.27 m 深度为浅灰绿色安山岩;95.27~102.51 m 深度为呈泥状的构造破碎带,原岩为安山岩,呈典型的低磁化率—低电阻率—低极化率组合特征;102.51~110.00 m 为灰绿色安山岩,呈典型的高磁化率—高电阻率—中低极化率组合特征。

对测井曲线值进行交会图(图8)分析,获得了

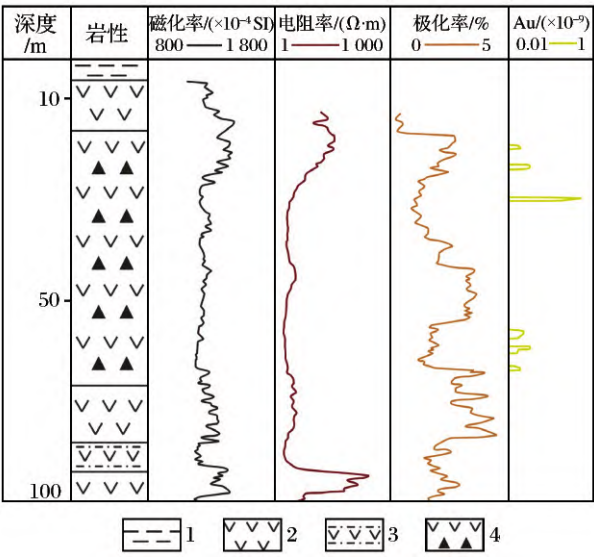


图7 钻孔测井主要曲线成果

Fig.7 Main curves results of drillhole logging

1. 腐殖土;2. 安山岩;3. 破碎安山岩;4. 安山质火山角砾岩

钻遇岩、矿层的测井响应特征:

(1)从主要岩性段电阻率—磁化率交会图[图8(a)]可以看出,岩性可划分为3种情况:①较完整、致密的安山岩,测井曲线特征为高电阻率和高磁化率。②安山岩破碎带,测井曲线特征为低电阻率和低磁化率。③安山质火山角砾岩,测井曲线特征为低电阻率和低磁化率,但总体取值和分布范围均略高于安山岩破碎带。

(2)从安山质火山角砾岩蚀变带与未蚀变带电



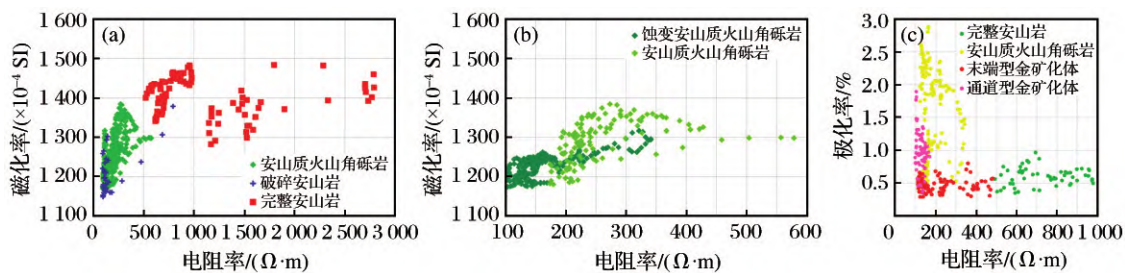


图8 钻孔主要岩性段(a)、蚀变带(b)电阻率—磁化率和含金矿段电阻率—极化率(c)交会图

Fig.8 Intersection diagram of resistivity-magnetisation of the main lithological sections (a), alteration zones (b) and resistivity-polarisation (c) of gold-bearing section of borehole

阻率—磁化率交会图[图8(b)]可以看出,相对未蚀变带,蚀变带电阻率和磁化率值均呈降低趋势。

(3)从ZK01钻孔赋金矿段电阻率—极化率交会图[图8(c)]可以看出,未蚀变矿化的安山岩为高电阻率和低极化率;富含黄铁矿的部分也不含金矿体,表现为高极化率和低电阻率,推测为岩性和黄铁矿所致。2个含矿段电性有所不同,相对较深(65~80 m)的含金矿段的电阻率分布呈低值(100~180  $\Omega \cdot m$ ),极化率分布为低—中值(0.6%~2.2%),组合特征为低电阻率和低—中极化率。由于该矿段位于热液蚀变带(图6)中,故划分为热液通道型金矿体。相对较浅(20~35 m)的含金矿段的电阻率分布呈低—中值(100~500  $\Omega \cdot m$ ),极化率分布为低值(0.3%~0.6%),组合特征为低—中电阻率和低极化率。由于该矿段位于浅部完整安山岩下方(图6和图7),推测为含金热液遇到上部相对完整安山岩或地下水混合所致,因此划分为热液末端型金矿体。极化率最高的安山质火山角砾岩相对富含黄铁矿但无金矿体,被划分的2种金矿体所夹持[图6、图7和图8(c)]。热液末端型金矿体在本钻孔的一个显著特点是其上方有明显的高阻/高磁体及其下部的梯度变化带,反映了热液对围岩物理性质的渐变性改变,其变化规律也与磁法、激电中梯扫面的视电阻率异常一致,表明前面的扫面工作中主要反映的是浅部金矿体的地球物理特征。

## 6 讨论

如前所述,应用地球物理方法直接找金矿体尚不能实现,但利用与金矿形成相关的各种地质因素,如矿化蚀变、围岩和断裂等,导致磁场、电阻率

和极化率变化,从而实现间接找金是可以达成的。阿陵河矿区是利用地球物理方法研究浅成低温热液型金矿地球物理勘探的优越地区,研究区地表和钻孔所揭示相对单一的岩性、构造条件和相对丰富的蚀变、矿化情况,为本文研究浅成低温热液型金矿体的赋存条件提供了相对简单的背景和比较明确的结论。

安山岩分布区的条带状低磁异常反映了热液蚀变的退磁作用,指示了蚀变区的存在。因此,本区金矿勘探应首先关注地质填图区上同一岩性但磁化率明显偏低的地区,查明是否由热液蚀变所导致。安山岩磁高值区不能排除金矿体隐伏于大片完整安山岩的下方,但考虑研究区破碎带和火山角砾岩发育,大片完整安山岩发育的可能性较小,因此磁高值区的金成矿潜力较小。

对于磁法探测到的蚀变带退磁导致的低异常:由于磁法探测的深度有限,且难以有效分离垂向叠加异常,因此仅适用于蚀变带被剥蚀至近地表的情况。因此,即使蚀变带有明显的退磁作用,若在岩性混杂区,或其上部覆盖了具有明显磁性的岩席和岩脉,难以取得本文中如此典型的条带状磁低异常,应结合激电中梯的低电阻异常,从平面角度判断蚀变带分布。尽管低电阻率异常与低磁异常的平面分布基本一致,但其成因是同一热液活动过程中不同的地球物理响应,表现为低磁异常来自于热液对安山岩的温度变化,而低电阻率是热液通道自身具有一定孔隙度,含地下水之后电阻率显著降低。因此,勘探工作中应注重磁法和电法扫面的综合解译,从而缩小靶区优选。

在金矿勘探探测井资料应用方面,以往研究主要是在识别岩性和破碎带的基础上寻找黄铁矿和石

英脉,认为低阻高极化低磁组合是寻找金矿的有利层位(王新娥等,2014;刘东明等,2024)。对于浅成低温热液型金矿,测井方法具有多种用途,其中岩性和破碎带识别是测井方法的基本用途。在金矿化蚀变方面,可划分因泥化、硅化和黄铁矿化带来的物性改变。本次验证钻孔岩心编录发现,高极化率部位发育有星点状黄铁矿,但并不含金,发现的金矿体位于高密度激电反演剖面的高视充电率和测井曲线的高极化率区上下两侧,意味着高极化率异常仍值得关注,低硫型的金矿体很可能位于高极化率区两侧。因此,钻孔部署的平面位置、走向和倾向需考虑该情况。在进一步研究中,建议采用更多的测井曲线,包括中子、密度和放射性测井,测量矿化蚀变带与围岩的孔隙度、密度、放射性元素分布的差异。在金矿体圈定方面,应重点关注Au元素与黄铁矿、石英的分布关系,兼顾放射性元素迁移方面的研究。

本研究发现具有不同地球物理特征组合的金矿体具有不同的空间分布特征,这可能与成矿流体中硫化物和金的析出先后不同有关,该过程与温度等物理化学条件的变化有关(Brathwaite et al.,2002; Farsang et al.,2024)。地球物理方法本身无法对该问题进行深入研究,需要开展岩石地球化学和高温高压试验研究,来明确黄铁矿与金矿体之间的关系,从而提升利用极化率异常寻找金矿体的指导意义。此类金矿体与黄铁矿空间分布差异可能是低硫型浅成低温热液型金矿的地球物理特征,末端型金矿体位于浅成低温热液型成矿系统的末端,是金矿床后期遭遇较少剥蚀的证据,可能暗示着此类金矿体位于多宝山成矿带内大型浅成低温—斑岩型成矿系统的末端(Sillitoe,2010),研究区深部具有较大的找矿潜力。

## 7 结论

(1)浅覆盖区浅成低温热液型金矿地球物理勘查可采用高精度磁法、激电中梯法、高密度激电法和测井方法逐步聚焦勘探靶区、探测矿化带垂向特征,从而为钻孔部署提供地球物理依据。具体方法如下:首先,在土壤金异常区开展全覆盖的高精度磁法扫面工作,在分析岩体分布的基础上,进一步

依据磁法、土壤金异常组合特征,对推断的热液蚀变区开展激电中梯扫面工作,圈定低阻高极化异常区;然后,围绕有利成矿构造和物化探叠合异常,为调查圈定的异常区岩体、构造和蚀变带垂向电阻率和极化率分布特征,开展了高密度激电法测量(深度小于100 m)或激电测深工作(深度大于100 m)。综合分析物探异常,推断出含硫化物的蚀变带空间展布,提出了孔位建议,进而开展钻孔验证并实施测井及分析研究工作。

(2)热液蚀变区具有低磁、低电阻率组合异常特征,安山岩分布区的条带状低磁异常反映了热液蚀变的退磁作用,热液温度造成的安山岩围岩的磁化率降低值可达1 000 nT。

(3)高极化率异常虽不能直接指示金矿体,但也具有重要的找矿意义。浅成低温热液型金矿体因其空间分布位置不同,可划分为“通道型”的低电阻率与低—中极化率电性异常组合和“末端型”的低—中电阻率与低极化率的电性异常组合,金矿体的低、中极化率分布于高极化率异常两侧,反映了浅成低温热液型金矿体与黄铁矿空间分布存在差异。

(4)本次研究发现的金矿体推测是浅成低温成矿系统的末端,是金矿成矿后遭遇较少剥蚀的证据。研究区深部具有较大的金多金属找矿潜力。

## 参考文献(References):

- Allis R G, 1990. Geophysical anomalies over epithermal systems [J]. *Journal of Geochemical exploration*, 36: 339-374.
- Bai Chenglin, Xie Guiqing, Zhao Junkang, et al, 2024. Metallogenic characteristics and ore deposit model of porphyry copper-epithermal gold system in the Duobaoshan ore field, eastern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 31 (3): 170-198.
- Brathwaite R L, Faure K, 2002. The Waihi epithermal gold-silver-base metal sulfide-quartz vein system, New Zealand: Temperature and salinity controls on electrum and sulfide deposition [J]. *Economic Geology*, 97 (2): 269-290.
- Chen Man, Zhou Dianyu, Li Dexin, 2008. Analysis and verification of Au geochemical exploration anomaly in forest landscape area, great Xing'an range [J]. *Gold Science and Technology*, 16 (1): 24-27.
- Cheng Lin, 2017. Ore genesis of the Sandaowanzi Telluride-Gold Deposit in Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin



- University.
- Cui Feng, 1990. Analysis of relations of apparent charging rate and chargeability[J]. *Jiangsu Geology*, (3): 51-53.
- Doyle H A, 1990. Geophysical exploration for gold—A review [J]. *Exploration Geophysics*, 17: 169-180.
- Farsang S, Zajacz Z, 2024. Sulfur species and gold transport in arc magmatic fluids[J]. *Nature Geoscience*, (12): 1-15.
- Fatehi M, Asadi H H, 2019. Geophysical signatures of the gold rich porphyry copper deposits: A case study at the Dalli Cu-Au porphyry deposit[J]. *Journal of Economic Geology*, 10 (2): 639-675.
- Ge Xinmin, Fan Yiren, Li Jun, et al, 2019. Experimental studies and investigations on the dual lateral log response of near borehole fractures [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62 (1): 354-360.
- Hao Tianyao, Liu Yike, Duan Chuang, 1996. Approaching fault system of the east China and adjacent area from gravity and magnetic data [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36 (Supp. 1): 141-149.
- Hao Yujie, 2015. Mineralization and Metallogenic Regularity of Duobaoshan Ore Concentration Area in Heilongjiang Province, Northeast China[D]. Changchun: Jilin University.
- Hedenquist J W, Arribas R A, Gonzalez-Urien E, 2000. Exploration for epithermal gold deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 245-277.
- Hedenquist J W, Lowenstern J B, 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 370: 519-527.
- Henley R W, 1991. Epithermal Gold Deposits in Volcanic Terranes [M]//Foster R P. *Gold Metallogeny and Exploration*. Boston: Springer.
- Hoschke T G, 2011. Geophysical Signatures of Copper-Gold Porphyry and Epithermal Gold Deposits, and Implications for Exploration [M]. Tasmania: University of Tasmania.
- Hoschke T, Sexton M, 2005. Geophysical exploration for epithermal gold deposits at Pajingo, North Queensland, Australia [J]. *Exploration Geophysics*, 36(4): 401-406.
- Huang K, Xie G Q, Duan L A, et al, 2022. Identification of Paodaoing large intermediate-sulfidation epithermal gold deposit in Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implication for mineral exploration [J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 440-448.
- Kawasaki K, Okada K, Kubota R, 1986. Geophysical surveys in the Hishikari mine area [J]. *Mining Geology*, 36: 131-147.
- Li Chenglu, 2018. Gold Metallogeny and Prospecting in the Nenjiang-Heihe Tectonic Melange Zone, Heilongjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Li Derong, Zhu Chaoli, Lü Jun, et al, 2010. Structural-magmatic mineralization of Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt, Heilongjiang [J]. *China Mining Magazine*, 19(Supp.): 142-146.
- Li S N, Ni P, Bao T, et al, 2018. Geology, fluid inclusion, and stable isotope systematics of the Dongyang epithermal gold deposit, Fujian Province, southeast China: Implications for ore genesis and mineral exploration [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 195: 16-30.
- Lipson R, 2014. The promise and perils of porphyry deposits in the future of gold production [J]. *SEG Newsletter*, 98: 1-21.
- Liu Baoshan, Cheng Zhaoxun, Shao Jun, et al, 2022. Latest prospecting progress and exploration direction of copper-gold polymetallic deposit in Nenjiang-Heihe area, Heilongjiang Province [J]. *Geology and Resources*, 31(3): 331-341.
- Liu Dongming, Liang Mingxing, Feng Jie, et al, 2024. Response characteristics and its prospecting signs of geophysical well logging in Xiaotongjiabuzi gold deposit, Eastern Liaoning Province [J]. *Earth Science*, 49(3): 1066-1080.
- Liu Shanli, Li Wei, Sun Guosheng, et al, 2011. Applications of high-precision magnetic measurement in checking Kelidai gold deposit, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 30(4): 666-670.
- Liu Xiaoyu, 2021. Magnetostratigraphy and Discussion on J/K Boundary of LK-1 Borehole in Lingshan Island [D]. Beijing: China University of Petroleum.
- Liu Yongjiang, Feng Zhiqiang, Jiang Liwei, et al, 2019. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 3017-3047.
- Ma Dexi, Yu Aijun, Ge Liangsheng, et al, 2008. Application of multi-electrode electrical method in gold ore prospecting [J]. *Geology and Prospecting*, 44(3): 65-69.
- Mao Guangwu, Cao Liang, Yan Xieping, et al, 2015. A review of research on epithermal gold deposits [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(1): 121-132.
- Richarte D, Correa-Otto S, Klinger F L, et al, 2023. Geophysical characterization of a low sulfidation epithermal gold and silver deposit, Mendoza, Argentina [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 123: 1-10.
- Seigel H O, Johnson I, Hennessey J, 1984. Different methodology: Geophysical aids to gold exploration [J]. *The Leading Edge*, 3(6): 32-36.
- Shi Dongyan, Zhang Kun, Zhang Yupeng, et al, 2021. Geophysi-

- cal and geochemical characteristics and prospecting criteria of shallow overburden area in Heilongjiang Province: A case study of 340 Highland gold mineralization in Heihe City [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(4): 1042-1053.
- Sillitoe R H, 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 44(3): 373-388.
- Sillitoe R H, 2010. Porphyry copper systems [J]. Economic Geology, 105(1): 3-41.
- Sillitoe R H, Hedenquist J W, 2003. Linkage between volcano-tectonic settings, ore-fluid composition, and epithermal precious metal deposits [C]//Simmons S F, Graham I. Volcanic, Geothermal and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth. Society of Economic Geologists Special Publication, 10: 315-343.
- Sun Jinggui, Liu Yang, Xu Zhikai, et al, 2023. Large-scale epithermal mineralization of late Mesozoic and the constraints of deep geological processes on mineralization in the continental margin of NE China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 53(3): 651-692.
- Sun Jingpeng, 2016. Rock Magnetism and Paleomagnetism of Upper Cretaceous Volcanic Rocks from CCSD-LK-I, in Ji-aolai Basin, Shandong [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences.
- Sun Zhongren, Wei Wenbo, 2004. Application of the high density resistivity method in gold exploration work [J]. Oil Geophysical Prospecting, 39(B11): 118-122.
- Wan Fei, 2013. Characteristics, Genesis and Prospecting Criteria of the Mesozoic Epithermal Gold Deposits in Yanbian Area [D]. Changchun: Jilin University.
- Wang Hongyu, Li Tao, 2016. The application of dual frequency IP method to the exploration of mineral resources in Western Australia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 40(5): 923-928.
- Wang Xin'e, Xu Donghui, Sun Zhifu, et al, 2014. Wireline logs analysis and application of Shandong gold resources scientific drilling [J]. Advances in Earth Science, 29(3): 397-403.
- Wu Guoxue, 2007. High accuracy magnetic prospecting on earth surface in gold mine exploration—Take the Shisangongli exploring area out of Wulaga gold deposit in Heilongjiang Province as an example [J]. Progress in Geophysics, 22(5): 1637-1641.
- Yin Qichun, Wang Yuanjun, Zhou Daorong, et al, 2022. Application of complex resistivity method to shale gas exploration in the Nanling Basin, Anhui Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 46(3): 668-677.
- Zhang Fucheng, Yang Yanchen, Li Xiangwen, et al, 2015. The effect of applying geophysical and geochemical anomalies to the Shiwuliqiao gold deposit in Heilongjiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39(2): 262-267.
- Zhao Lifang, Li Xiyuan, Li Chengli, et al, 2022. Recognition of concealed porphyry body and deep prospecting practice in Duobaoshan ore concentration area based on gravity, magnetic and electromagnetic surveys [J]. Minerals Deposits, 41(6): 1217-1231.
- Zhao Zhonghai, Cui Xiaomeng, Sun Jinggui, et al, 2024. Deep metallogenic prediction based on 3D geological-geophysical model: A case study of Yongxin gold deposit in Heihe area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 54(2): 498-515.
- Zhao Zhonghai, Qu Hui, Guo Yan, et al, 2011. Metallogenic rules and prospecting orientation of gold deposit in the Duobaoshan area, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 20(2): 89-95.
- Zhu Lian, 2014. Synthetic Metallogenic Prognosis of Au Deposit on Dong'an-Tangwanghe Region, Heilongjiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 柏毓璘, 谢桂青, 赵俊康, 等, 2024. 试论中亚造山带东部多宝山矿田斑岩铜—浅成低温金系统成矿特征与矿床模型 [J]. 地学前缘, 31(3): 170-198.
- 陈满, 周殿宇, 李德新, 2008. 大兴安岭森林景观区金化探异常查证方法探讨 [J]. 黄金科学技术, 16(1): 24-27.
- 程琳, 2017. 黑龙江省三道湾子碓金矿床成因研究 [D]. 长春: 吉林大学.
- 崔峰, 1990. 视充电率和视极化率关系分析 [J]. 江苏地质, (3): 51-53.
- 葛新民, 范宜仁, 李军, 等, 2019. 井旁裂缝的双侧向测井物理模拟及特征分析 [J]. 地球物理学报, 62(1): 354-360.
- 郝天兆, 刘伊克, 段昶, 1996. 根据重、磁资料探讨中国东部及领域断裂体系 [J]. 地球物理学报, 36(增1): 141-149.
- 郝宇杰, 2015. 黑龙江省多宝山矿集区成矿作用与成矿规律研究 [D]. 长春: 吉林大学.
- 李成禄, 2018. 黑龙江省嫩江—黑河构造混杂岩带金矿成矿作用及找矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李德荣, 朱朝利, 吕军, 等, 2010. 黑龙江三矿沟—多宝山成矿带构造—岩浆成矿作用 [J]. 中国矿业, 19(增): 142-146.



- 刘宝山,程招勋,邵军,等,2022.黑龙江嫩江—黑河地区铜金多金属找矿新进展及勘查方向[J].地质与资源,31(3):331-341.
- 刘东明,梁明星,冯杰,等,2024.辽东小佟家堡子金矿床地球物理测井响应特征及找矿标志[J].地球科学,49(3):1066-1080.
- 刘善丽,黎伟,孙国胜,等,2011.高精度磁法测量在内蒙古克力代金矿点查证中的应用[J].世界地质,30(4):666-670.
- 刘晓宇,2021.灵山岛灵科1井磁性地层综合研究及J/K界线探讨[D].北京:中国石油大学.
- 刘永江,冯志强,蒋立伟,等,2019.中国东北地区蛇绿岩[J].岩石学报,35(10):3017-3047.
- 马德锡,于爱军,葛良胜,等,2008.高密度电法在金矿勘查中的应用[J].地质与勘探,44(3):65-69.
- 毛光武,曹亮,严卸平,等,2015.浅成低温热液型金矿研究综述[J].地质找矿论丛,30(1):121-132.
- 史冬岩,张坤,张玉鹏,等,2021.黑龙江省浅覆盖区地物化特征与找矿标志:以黑河市340高地金矿化区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),54(4):1042-1053.
- 孙景贵,刘阳,徐智恺,等,2023.试论中国东北部陆缘晚中生代浅成热液大规模成矿与深部地质过程对成矿制约[J].吉林大学学报(地球科学版),53(3):651-692.
- 孙靖鹏,2016.胶莱盆地鲁科一井上白垩统火山岩的岩石磁学和古地磁学研究[D].北京:中国科学院大学.
- 孙中任,魏文博,2004.高密度电阻率法在金矿勘查工作中的应用效果[J].石油地球物理勘探,39(B11):118-122.
- 万飞,2013.延边地区中生代浅成低温热液型金矿特征、成因及找矿标志[D].长春:吉林大学.
- 王宏宇,李涛,2016.双频激电法在西澳矿产勘查中的应用[J].物探与化探,40(5):923-928.
- 王新娥,许东晖,孙之夫,等,2014.山东黄金资源钻探井测井资料分析方法与应用[J].地球科学进展,29(3):397-403.
- 吴国学,2007.金矿勘查中的地面高精度磁法测量——以黑龙江乌拉嘎金矿外围十三公里勘查区为例[J].地球物理学进展,22(5):1637-1641.
- 殷启春,王元俊,周道容,等,2022.复电阻率法在安徽南陵盆地海相页岩气勘探中的应用[J].物探与化探,46(3):668-677.
- 张富程,杨言辰,李向文,等,2015.十五里桥金矿区物化探异常特征及应用[J].物探与化探,39(2):262-267.
- 赵理芳,李希元,李成立,等,2022.基于重、磁、电法的多宝山矿集区隐伏斑岩体识别与深部找矿实践[J].矿床地质,41(6):1217-1231.
- 赵忠海,崔晓梦,孙景贵,等,2024.基于三维地质地球物理建模的深部成矿预测:以黑河地区永新金矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),54(2):498-515.
- 赵忠海,曲晖,郭艳,2011.黑龙江多宝山成矿区金矿成矿规律及找矿方向[J].地质与资源,20(2):89-95.
- 朱炼,2014.黑龙江东安—汤旺河地区金矿地物化遥综合成矿预测[D].北京:中国地质大学(北京).

## Geophysical Exploration Method of Epithermal Gold Deposit in Shallow Overburden Area: A Case Study of Alinghe Mining Area in Heihe City, Heilongjiang Province

YIN Qichun<sup>1,2,3,4,5</sup>, JI Yuan<sup>3,5</sup>, WANG Kang<sup>3,5</sup>, TAN Guili<sup>6</sup>, SUN Tong<sup>3,5</sup>, YANG Huaben<sup>1,5</sup>, Chen Haijiang<sup>1,5</sup>, SUN Yanhai<sup>1,5</sup>

1.Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150081, Heilongjiang, China;

2.Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

3.Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education of the People's Republic of China, Changsha 410083, Hunan, China;

4.School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

5.Scientific Monitoring and Research Station of Earth Critical Zone on Black Soil in Harbin, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

6.Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

**Abstract:** In shallow overburden area, acquiring geological prospecting information via geological outcrops

presents significant challenges. Consequently, there is an urgent requirement for the implementation of geophysical technologies to enhance the optimization of prospecting target areas and the strategic placement of boreholes. Typically, epithermal gold deposits do not directly produce geophysical anomalies. The geophysical properties of gold ore bodies, alteration zones, and their surrounding lithologies remain insufficiently understood. The Alinghe mining area, located within the forested region of northeast China, is characterized by shallow soil cover. The scarcity of rock outcrops has rendered traditional geological and mineral mapping techniques largely ineffective, underscoring the necessity for an increased reliance on geophysical prospecting methods in gold exploration. In response, we conducted high-resolution 1:5 000 magnetic surveys over areas exhibiting soil gold anomalies, alongside 1:5 000 induced polarization (IP) measurements using gradient arrays in selected hydrothermal alteration zones. Through the integrated analysis of resistivity and polarizability anomalies, we identified areas with favorable gold mineralization potential. Subsequently, electrical resistivity tomography (ERT) was employed to delineate vertical geological characteristics. In conclusion, verification of drilling and logging activities was conducted. The aforementioned geophysical exploration study yielded the following findings: (1) A series of parallel magnetic anomaly stripes were identified within the andesite distribution area. The observed low magnetic anomalies are attributed to the demagnetization effect resulting from hydrothermal alteration. Hydrothermal activity can reduce the magnetic susceptibility of andesite by up to 1 000 nT. (2) Induced polarization (IP) measurements revealed that the distribution of low apparent resistivity aligns closely with the regions of low magnetic anomalies. The apparent resistivity in the hydrothermally altered area is  $100\ \Omega \cdot \text{m}$  lower than that of the surrounding regions, indicating a water-rich shallow hydrothermal alteration zone. The anomaly of high apparent polarizability suggests a relatively pyrite-rich area associated with epithermal gold ore bodies. (3) Occam's inversion of electrical resistivity tomography (ERT) data effectively delineates vertical geological features, including surrounding rock, hydrothermal channels, and pyritization zones, which are closely associated with gold mineralization. (4) The geological and alteration assumptions derived from the aforementioned geophysical data were validated by borehole ZK01 along the ERT line, resulting in the identification of two gold-bearing horizons and six gold mineralized bodies within a depth of 100 meters. Through the analysis of curves and crossplots of various logging parameters, the geophysical characteristics of the six gold mineralized bodies were categorized into channel type and terminal type. These two types of gold deposits are distributed on both the upper and lower sides of the high polarizability anomaly, suggesting that a high polarizability anomaly alone is not a direct indicator of a gold ore body, although it holds significant implications for prospecting. In this study, the epithermal gold deposit was systematically targeted for detection. A range of surface geophysical exploration methods was employed to progressively and effectively refine the exploration target area. Subsequent borehole verification confirmed the presence of several gold mineralized bodies, thereby validating the efficacy of the employed methods. The two distinct types of gold-mineralized bodies, categorized based on the combination of geophysical parameters and spatial distribution differences, indicate a terminal position within the mineralization system and suggest minimal erosion post-mineralization. This distinction holds significant implications for the interpretation of geophysical data and has practical relevance for prospecting and exploration efforts.

**Key words:** shallow overburden area; epithermal gold deposit; low sulfur type; integrated geophysical exploration; logging analysis; hydrothermal alteration; Alinghe mining area; Heilongjiang Province